

Knuutti Lehtinen

Mobiiliverkkojen kehitys ja verkkojen kapasiteetin muuttuminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Koulutusohjelman nimi

Insinöörityö

20.4.2013

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Knuutti Lehtinen Mobiiliverkkojen kehitys ja verkkojen kapasiteetin muuttuminen 29 sivua 5.3.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Tietotekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Tietoliikenne tekniikka
Ohjaaja	Yliopettaja Pertti Jäppinen
<p>Työn tavoitteena oli selvittää miten matkapuhelinverkot ovat kehittyneet. Verkkotekniikat rajattiin Suomessa nykyisin toimiviin verkkoihin.</p> <p>Työssä katselmoidaan läpi nykyiset matkapuhelinverkkojen, GSM- (Global System for Mobile Communications), UMTS- (Universal Mobile Telecommunication Services) ja LTE- (Long Term Evolution), verkkorakenteet ja verkkojen data- ja puhekapasiteetit. Jokaisesta verkosta näytetään pääpiirteittäin verkon rakenne ja kerrotaan eri komponenttien päätehtävät. Lisäksi selvitetään jokaisen verkon teoreettiset käyttäjämäärät puhekäyttäjinä ja datanopeuksina.</p> <p>Työssä käydään läpi jokaisen verkkotekniikan pääkohdat Suomessa. Samalla myös UMTS- ja LTE-verkkojen toimivuutta käytännöntasolla on havainnoitu verkko-operaattori DNA:n tekemillä mittauksilla. Toisessa mittauksessa DNA muutti yhdellä alueella UMTS -verkossa taajuutta ja katsoi sen vaikutusta verkonvaihtojen määrään ja verkon käyttöihin. Toisessa mittauksessa on yhdeltä alueelta mitattu datanopeuksia UMTS- ja LTE-verkoissa.</p> <p>Voidaan huomata, että datanopeudet ovat verkoissa kasvaneet huomattavasti ja samalla tietenkin verkot pystyvät palvelemaan useampia puhekäyttäjiä. Vaikka teoreettisiin datanopeuksiin ei juurikaan päästä, on muutos silti selvä.</p>	
Avainsanat	GSM, UMTS LTE, 2G, 3G, 4G, mobiiliverkot

Author Title Number of Pages Date	Knuutti Lehtinen Development of mobile networks and change of network capacities 29 pages 5 May 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information Technology
Specialisation option	Telecommunication
Instructor	Pertti Jäppinen, Principal Lecturer
<p>The goal for the thesis was to describe how mobile networks have developed and how capacities have changed. The chosen network technologies were limited to those which work in Finland now.</p> <p>The mobile networks that are described in this thesis are the GSM (Global System for Mobile Communications), UMTS (Universal Mobile Telecommunication Services) and LTE network (Long Term Evolution). The network architecture of each network is explained and the basic operational principles of every component are described. In addition, theoretical user capacities, including the number of speech users and data speeds, were documented.</p> <p>This thesis also gives an overview of how each network technology has developed in Finland. There are also measurements which the network operator DNA has made in UMTS and LTE networks. Firstly DNA changed the UMTS-network frequency in one area and monitored how it affected network exchanges and the user amounts of UMTS- and GSM-networks. Otherwise, data speed were measured in UMTS- and LTE-networks.</p> <p>The results showed that data speeds have changed considerably and at the same time networks can give service to a growing number of speech users. Even though networks cannot always reach theoretical maximum data speeds, change towards the better is clear.</p>	
Keywords	GSM, UMTS, LTE, 2G, 3G, 4G, mobile networks

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	GSM-verkko	1
2.1	GSM-verkot Suomessa	1
2.2	Verkon rakenne	3
2.3	Tiedonsiirto GSM-verkossa	5
2.4	Kapasiteetti	6
3	UMTS- / WCDMA-verkko	10
3.1	UMTS-verkot Suomessa	10
3.2	Koodijakokanavointi, (W)CDMA	12
3.3	Verkon rakenne	13
3.4	Kapasiteetti	14
4	LTE-verkko	19
4.1	LTE Suomessa	19
4.2	Ortogonaalinen taajuusjakokanavointi	19
4.3	Verkon rakenne	19
4.4	Puhe LTE-verkossa	22
4.5	Kapasiteetti	23
4.6	LTE-Advanced	24
5	DNA:n suorittama 3G- ja LTE-verkkojen siirtonopeuden mittaust.	25
6	Yhteenveto	27
	Lähteet	29

Lyhenteet

AuC	<i>Authentication Center.</i> Hoitaa GSM verkossa todennusta.
BCH	<i>Broadcast Channel.</i> Yleisten viestien lähetyskanava.
BCCH	<i>Broadcast Control Channel.</i> Yleisten kontrolliviestien lähetyskanava.
BTS	<i>Base Transceiver Station.</i> 2G-verkon osa, tukiasema.
CCCH	<i>Common Control Channel.</i> Yleinen hallintaviestien kanava.
CCE	<i>Control Channel Elements.</i> Kontrollikanavan elementtejä LTE-verkossa.
CDMA	<i>Code Division Multiple Access.</i> Koodijakokanavointi, käytetään 3G tekniikassa.
CN	<i>Core Network.</i> 3G-verkon ydinverkosta kutsuttu termi.
CSFB	<i>Circuit Switched Fallback.</i> LTE-tekniikassa käytettävä termi kun puheominaisuudet suoritetaan piirikytkenäisesti.
d	välimatka kilometreissa
DCCH	<i>Dedicated Control Channel.</i> Dedikoitu kontrollikanava.
E/N (BLER)	Signaalin voimakkuus bittiä kohden jaettuna häiriöspektrin tiheydellä.
EIR	<i>Equipment Identity Register.</i> Laiterekisteri 2G-verkossa.
EPC	<i>Evolved Packet Core.</i> Kehittynyt runkoverkko.
EUTRAN	4G-verkon osa-alue, joka sisältää ilmarajapinnassa olevat komponentit.
f	taajuus

FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access.</i> Taajuusjakokanavointi, NMT-verkossa käytetty kanavointi.
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Node.</i> Rajapinta GPRS-verkon ja muiden verkkojen välillä.
GMSC	<i>Gateway MSC.</i> GSM-verkon yksikkö.
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying.</i> Modulointimenetelmä.
GPRS	<i>General Packet Radio Service.</i> GSM-verkon laajennus.
GSM	<i>Global System for Mobile Communications.</i> Ensimmäinen digitaalinen mobiiliverkko.
GSNs	<i>GPRS Support Nodes.</i> GPRS-laajennuksen tuomia lisäosia 2G-verkkoon.
GUTI	<i>Globally Unique Temporary Identity.</i> 4G-verkossa käytetty väliaikainen tunniste.
HLR	<i>Home Location Register.</i> Kotirekisteri, jossa on tietoja käyttäjistä.
HSCSD	<i>High-Speed Circuit Switched Data,</i> nopeampi piirikytkentäinen tiedonsiirto menetelmä.
HSS	<i>Home Subscription Server.</i> 4G-verkossa oleva tietokanta.
HSPA	<i>High-Speed Packet Access.</i> 3G-verkossa nopeammista datayhteyksistä käytetty termi.
I(ub)	Rajapinta RNC:n ja NodeB:n välillä
i	Keskimääräinen arvo tukiaseman tehon suhteesta oman solun ja toisen solun välillä.
ISDN	<i>Integrated Services Digital Network.</i> Piirikytkentäinen puhelinverkko.
IMEI	<i>International Mobile Equipment Identity.</i> Matkapuhelimen laitetunnus.

k	Bolzmännin vakio ($1.381 \cdot 10^{-23}$) J/K)
L	Vapaan tilan vaimennus (dB). Ilmoittaa paljonko signaali vaimenee vapaassa tilassa.
MME	<i>Mobility Management Entity</i> . 4G-verkon komponentti, joka on rajapinta muille verkoille.
MS	<i>Mobile Station</i> . Yleensä ajatellaan matkapuhelimeksi, voi olla myös muu mobiiliverkkoon kytkettävissä oleva laite.
MSC	<i>Mobile Services Switching Center</i> . 2G-verkon komponentti, joka hoitaa muun muassa puheluiden puheluohjausta.
N	Kanavien ja signaalipulssien määrä.
n(dI)	Matkapuhelimen suuntaan oleva kuormitusaste.
NF	Tukiaseman vastaanottimen häiriöluku
NMT	<i>Nordiska Mobiltelefongruppen</i> , myöhemmin <i>Nordisk Mobiltelefon</i> . Analoginen matkapuhelinverkko, kutsuttu myös 1G-verkoksi.
P-GW	<i>Packet Data Network Gateway</i> . 4G-verkossa oleva reititin.
P(bit)	<i>Punctured bit</i> . Prosessi, jossa poistetaan osa pariteettibiteistä enkoodauksen jälkeen. Virheen korjauksen koodi on mukana.
R(j)	Bittinopeus käyttäjälle j
RAN	<i>Radio Access Network</i> . 3G-verkon komponentti, joka toimii tukiaseman ja ydinverkon välillä.
RRM	<i>Radio Resource Management</i> . Radioresurssien hallintaa 3G-verkossa.
SCH	<i>Synchronization Channel</i> . Synkronointikanava.

SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i> . GPRS-verkon hallintakomponentti, joka hallitsee paketti dataa verkkoon päin.
S-GW	<i>Serving Gateway</i> . Hallitsee verkon suuntaan olevaa tunnelia käyttäjälaitteelta.
SHo	<i>Soft handover</i> . Puhelin siirtyy kahden solusta toiseen ja signalointi näin vaihtuu eri antennien välillä.
T	Lämpötila
TCH	<i>Traffic Channel</i> . Liikennekanava.
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> . Aikajakokanavointi, käytetään 2G-verkossa.
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication Services</i> . Tunnetaan myös nimellä 3G-verkko.
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i> . 3G-verkon laajempi osa-alue.
Uu	Rajapinta matkapuhelimen ja NodeB:n välillä.
v(j)	Toiminta-arvo käyttäjälle fyysisellä tasolla.
VLR	<i>Visitor Location Register</i> . Vierailijan lokaatiorekisteri.
W	WCDMA:n bittinopeus
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i> . UMTS-verkoissa käytettävä rajapinta.
x(k)	Symbolia vastaava digitaalipulssi.
QoS	<i>Quality of Service</i> . Tietoliikenteen priorisoinnista ja luokittelusta käytetty termi.

Z(i)

Kullakin kanavalla siirrettävä datasymboli kompleksilukuna esitettynä

1 Johdanto

Insinööriyön tarkoituksena on näyttää, miten digitaaliset matkapuhelinverkot ovat kehittyneet ja miten näiden kapasiteetti on muuttunut. Insinööriyössä tutkitaan teoreettisia radorajapinnan puhe- ja datakapasiteetteja, eli puhekäyttäjien määrää palvelevassa solussa ja datasiirtonopeuksia. 3G-kapasiteettiä laskettaessa lasketaan myös verkon aiheuttaman kuormituksen mukainen datakapasiteetti. Tällä laskennalla on tarkoitus näyttää teoreettisen ja käyttäjän kokeman kapasiteetin eroa optimaalisissa olosuhteissa. Työssä paneudutaan toisen ja kolmannen sukupolven verkkotekniikoihin ja lisäksi kerrotaan yleisemmällä tasolla neljännen sukupolven verkosta.

2 GSM-verkko

2.1 GSM-verkot Suomessa

Radiolinja oli Suomen ensimmäinen digitaalisen matkapuhelinverkon (GSM, Global System for Mobile Communications) operaattori ja sillä oli maailman ensimmäinen GSM-verkko. Vuonna 1991 maailman ensimmäinen GSM-puhelu soitettiin Radiolinjan verkossa, tämän puhelin soitti Harri Holkeri. Aluksi GSM-verkko toimi 900 MHz:n taajuudella, jolla saavutettiin suurempi peitto. 900 MHz:n verkon ruuhkaisuuden vuoksi 1800 MHz:n taajuudella toimiva verkko otettiin aikaisemman verkon rinnalle käyttöön. [6.]

Tukiaseman antamaa peittoa kummallakin taajuudella voidaan tarkastella laskemalla signaalin vaimennusta vapaassa tilassa kaavalla 1.

$$L = 20 \times \log(d) + 20 \times \log(f) + 32,4 \quad (1)$$

jossa L on vapaan tilan vaimennus (dB), d on välimatka (km) ja f on käytetty taajuus (MHz).

Kun tarkastellaan esimerkiksi 100 dB:n vaimennusta, niin 1800 MHz:n taajuudelle saadaan

$$100 \text{ dB} = 20 \times \log(d) + 20 \times \log(1800 \text{ MHz}) + 32,4$$

$$\log(d) = \frac{100}{20} - \log(1800) - \frac{32,4}{20}$$

$$\log(d) = 0,125$$

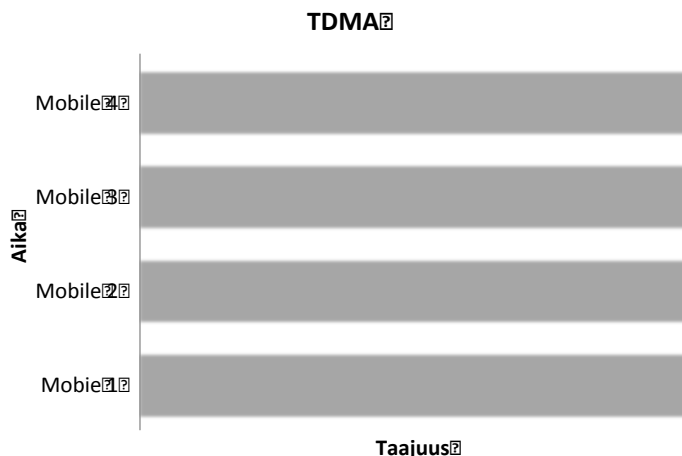
$$d = 10^{0,125} = 1,333 \text{ (km)}$$

Laskennassa ei ole otettu huomioon esteitä, jotka heikentävät signaalin etenemistä.

Nykyisin kaupallisia GSM-verkkoja Suomessa on kolmella yrityksellä: Elisalla, TeliaSoneralla ja DNA:lla. [6.]

Aikajakokanavointi, TDMA

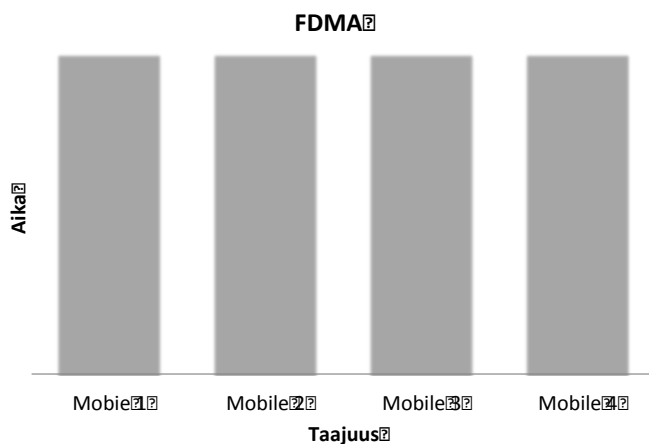
Aikajakokanavointia käytetään digitaalisessa radioverkossa. Yksi taajuus on jaettu useampaan aikaväliin, GSM-tekniikassa taajuus on jaettu kahdeksaan aikaväliin (kuva 1). Tämän johdosta GSM-tekniikassa yhdellä taajuudella pystyisi olemaan kahdeksan puhekäyttäjää samanaikaisesti, jos signalointiin ei tarvittaisi yhtään aikaväliä. TDMA-tekniikassa kaistanleveys on suurempi kuin taajuusjakokanavoinnissa (FDMA). [1, s. 15–17.]



Kuva 1. Aikajakokanavointi [1, s. 15–17].

Muutos analogisesta matkapuhelinverkosta (NMT, *Nordiska Mobiltelefongruppen*) aikaisesta taajuusjakokanavoinnista (FDMA) on huomattava. Taajuusjakokanavoinnissa taajuusalue on jaettu kanaviin, joilla on tietty kaistanleveys (kuva 2). Käyttäjä saa aina yhden kanavan kokonaan käyttöönsä, siirsi hän dataa sillä tai ei. Jokainen kanava tar-

vitsee oman lähetinyksikön, joten tukiaseman tehosuhte on heikko. Syötettävä data voi olla analogista tai digitaalista, mutta signaali on aina analoginen. Hyötynä tekniikalla on se, että käyttäjällä on resurssi aina käytettävissä, kun hän sitä tarvitsee. [1, s. 14–15.]



Kuva 2. Taajuusjakokanavointi [1, s. 14-15].

2.2 Verkon rakenne

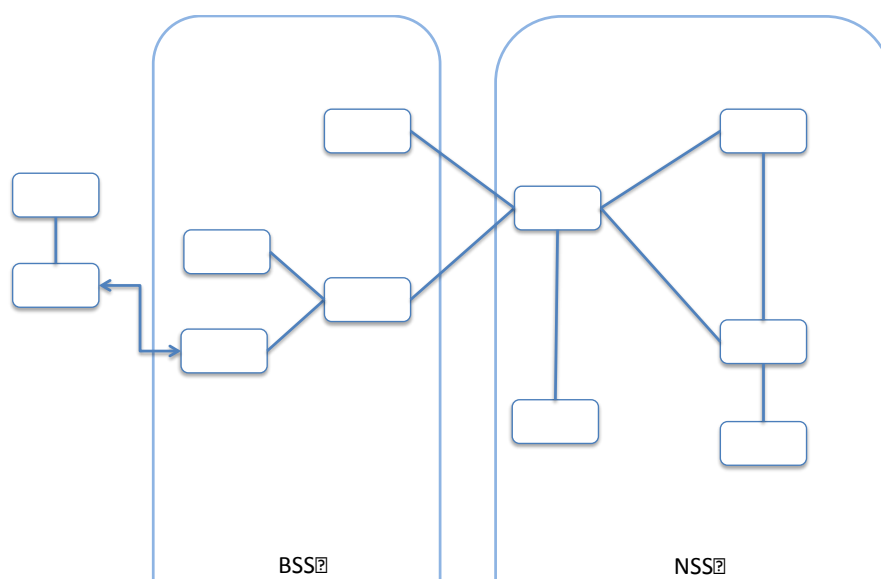
GSM-verkon rakenne näkyy kokonaisuudessaan kuvassa 3. Matkapuhelin (MS) kommunikoi ilmateitse tukiaseman (BTS) kanssa. Tukiasemassa sisältää lähetin- ja vastaanotinlaitteet, näitä ovat esimerkiksi antennit ja vahvistimet. Tukiasemassa hoidetaan myös muita signalointitoimia ja toimenpiteitä, kuten virheenkorjaus. Jotta tukiasema pysyy pienenä, olennaisia kontrollointi- ja protokollatiedusteluja hoidetaan tukiasemakontrollerissa (BSC). Se sisältää esimerkiksi protokollatoimintoja radiokanavan allokointiin, kanavan alustamiseen ja solun vaihtamiseen (handover) liittyvät toiminnot. Yksi BSC hallitsee useampaa BTS:ää, ja nämä ovat yhteydessä joko kiinteällä linjalla tai suunnatulla radiolinkillä. BTS ja BSC yhdessä muodostavat radioverkon (radio access network). [1, s. 43.]

Käyttäjien luoma liikenne reititetään kytkimeen, jota kutsutaan Mobile Switching Centeriksi (MSC). Se hoitaa kaiken reitityksen mobiiliverkon ja piirikytkentäisen puhelinjärjestelmän (ISDN) kanssa. Tämä sisältää reitin valinnat, datan edelleen lähettämisen ja palvelun tarjontaprosessit. Suurin ero ISDN:n ja MSC:n välillä on, että MSC huolehtii myös allokointi- ja radioresurssien hallitsemisesta sekä käyttäjän liikkuvuudesta. Tämän takia MSC:stä löytyy käyttäjien paikannusta varten rekisteri, jota hyödynnetään esimerkiksi, kun käyttäjä vaihtaa solua. Mobiiliverkkossa on yleensä useita MSC:itä,

jotka hoitavat yleensä jotain tiettyä loogista aluetta, esimerkiksi kaupunkia tai kuntaa. [1, s. 43.]

Koti- ja vierailijarekisterit (HLR/VLR) pitävät sisällään mobiilikäyttäjän nykyisen sijainnin. Tätä tietoa tarvitaan, kun verkko yrittää esimerkiksi ottaa yhteyttä MS:ään puhelun yhdistämisen vuoksi. HLR:ssä ja VLR:ssä on myös tieto käyttäjän profiilista, jota käytetään laskutukseen ja muihin hallinnollisiin asioihin. HLR:ssä on tiedot käyttäjän puhelinnumerosta, yhteysnumerosta, palvelusto- ja todennustiedot. VLR on vastuussa tietyistä osista verkkoa josta se tallentaa kaikkien käyttäjien paikkatiedot, oli käyttäjä kotiverkossa tai toisen verkon asiakas, joka vain vierailee tässä verkossa. Osa VLR:n tiedoista on kopioitu suoraan HLR:stä nopeuttamaan verkon toimintaa, mutta VLR:ssä on myös lisänä tietoa, jota HLR:ssä ei ole, esimerkiksi väliaikainen tilaajanumero, jota käytetään puheluiden aikana turvaamaan käyttäjän salaisuutta. Yleensä verkossa on yksi HLR ja jokaista MSC:tä kohden yksi VLR. Tämä tosin riippuu täysin tilaajien määrästä, koska HLR ja VLR pystyvät sisältämään vain rajatun määrän tietoa. [1, s. 44; s. 50–51.]

Autentikointikeskus (AUC) ja laiterekisteri (EIR) ovat vastuussa verkon turvallisuudesta. Verkon turvallisuus perustuu puhelinlaitteen varmentamiseen ja tilaajan henkilöllisyyden varmentamiseen. Luottamukselliset tiedot ja avaimet säilytetään tai luodaan AUC:ssä. Mobiililaitteen sarjanumero (IMEI), jonka valmistaja määrittelee, säilytetään EIR:ssä. Laitteen IMEI:n avulla verkko pystyy epäämään laitteen pääsyn verkkoon, jos esimerkiksi laite on ilmoitettu varastetuksi. [1, s.51–52.]



Kuva 3. GSM-verkon rakenne [1, s. 43–52].

2.3 Tiedonsiirto GSM-verkossa

GSM-verkko tukee itsessään jo piirikytkentäistä datansiirtoa, mutta se on aika hidasta ja resurssien hukkaan heittämistä. Piirikytkentäisessä datasiirrossa varataan yksi aikaväli matkapuhelimelle, jolloin saatiin siirtonopeus 9,6 kbit/s. Vaikka dataa ei siirretty, oli aikaväli aina varattu. Hyvänä puolena piirikytkentäiselle siirtotavalle on se, että verkon resurssia ei tarvitse pyytää erikseen, kun on tarvetta alkaa siirtää dataa. Näin datansiirto pääsee alkamaan nopeammin. [1, s. 96–109, 220–221.]

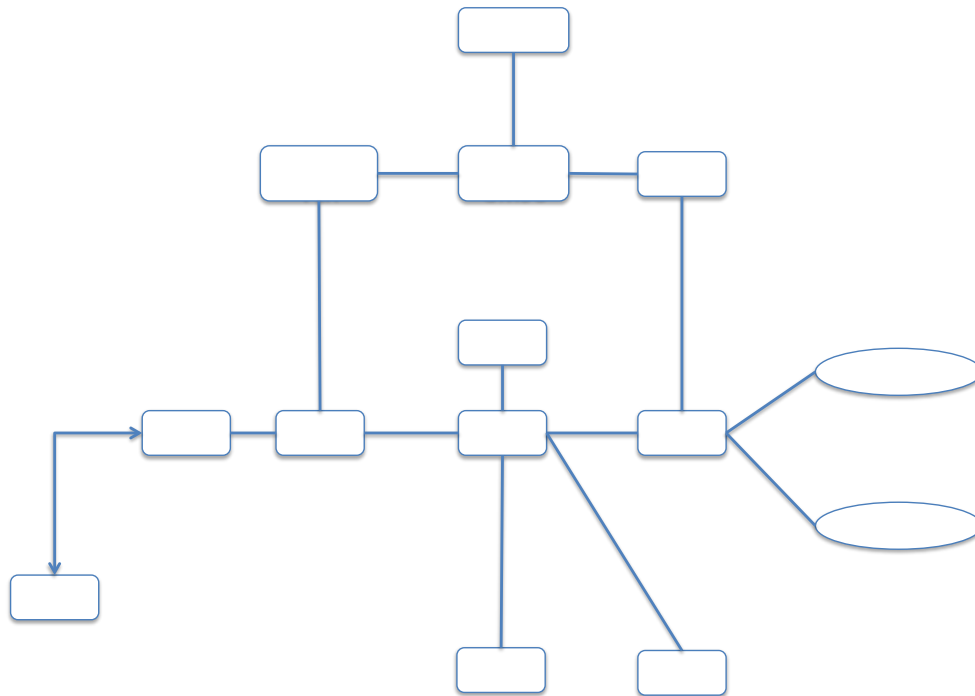
Piirikytkentäisessä tiedonsiirrossa nopeampiin yhteyksiin päästiin ns. HSCSD (High Speed Circuit Switched Data) -tekniikalla. Tässä tekniikassa aikavälejä otettiin enemmän käyttöön, jolloin tiedonsiirtonopeus kasvoi. Tekniikalla matkapuhelimelle voitiin varata enimmillään neljä aikaväliä. HSCSD tarjosi myös virheenkorjausta riippuen valitsemasta verkon laadusta. Näin saatiin siirtonopeutta nostettua vähän ja hyvissä oloissa yhdellä aikavälillä siirtonopeudeksi pystyi saamaan 14,4 kbit/s. Kun oli neljä aikaväliä käytettävissä, siirtonopeudeksi oli mahdollista saada 57,6 kbit/s. Kuitenkin on selvää, että kun yksi matkapuhelin varaa jatkuvasti jopa neljä aikaväliä, verkko ei pystynyt palvelemaan tehokkaasti muita käyttäjiä. [1, s. 96–109, 220–221.]

Seuraava kehitysaskel oli siirtyä pakettikytkentäiseen malliin, GPRS (General Packet Radio Service) kehitettiin nopeuttamaan datayhteyksiä (kuva 4). Pakettikytkentäisessä mallissa aikaväli varataan vain siksi ajaksi, kun tietoa sillä siirretään. Näin verkko pysyy tehokkaammin käyttämään tarjolla olevia resursseja ja useampi laite saa verkolta palveluita. Tämän takia myös verkkoon täytyi lisätä uusia elementtejä, joita kutsutaan GSNs:ksi, ne mahdollistavat pakettidatan siirtämisen. [1, s. 233–234.]

Serving GPRS Support Node (SGSN) varmistaa pakettidatan kulkemisen matkapuhelimelta verkkoon ja toisinpäin. SGSN:n tehtävänä on pakettien reititys ja siirto, toiminnot matkapuhelimen liittämiseen ja irrottautumiseen (attach/detach) sekä todentamiseen ja loogisen linkin hallitseminen. SGSN:ssä on myös paikannustiedot, kuten matkapuhelimen senhetkinen solu ja VLR, sekä käyttäjätietoja, kuten tilaajanumero ja osoite, jota käytetään pakettiverkossa. [1, s.234.]

Gateway GPRS Support Node (GGSN) toimii yhdyslinkkinä ulkoisiin pakettiverkkoihin, kuten internet tai intranet. GGSN tehtävä on muuttaa GPRS pakettidata, joka tulee SGSN:ltä, hyväksyttävään pakettidataprotokollaan (PDP), esimerkiksi IP, ja tämän jälkeen GGSN lähettää datan ulospäin. Ulkoverkosta tulevan PDP-osoitteen GGSN

muuntaa GSM-osoitteeksi, jotta GSM-verkko osaa lähettää datan oikeaan laitteeseen. Kun GGSN on tehnyt tämän muutoksen, se lähettää datan oikealle SGSN:n, joka taas välittää dataa eteenpäin. [1, s.234–235.]



Kuva 4. GPRS -verkon lisäys GSM-verkkoon [1, s. 233–235].

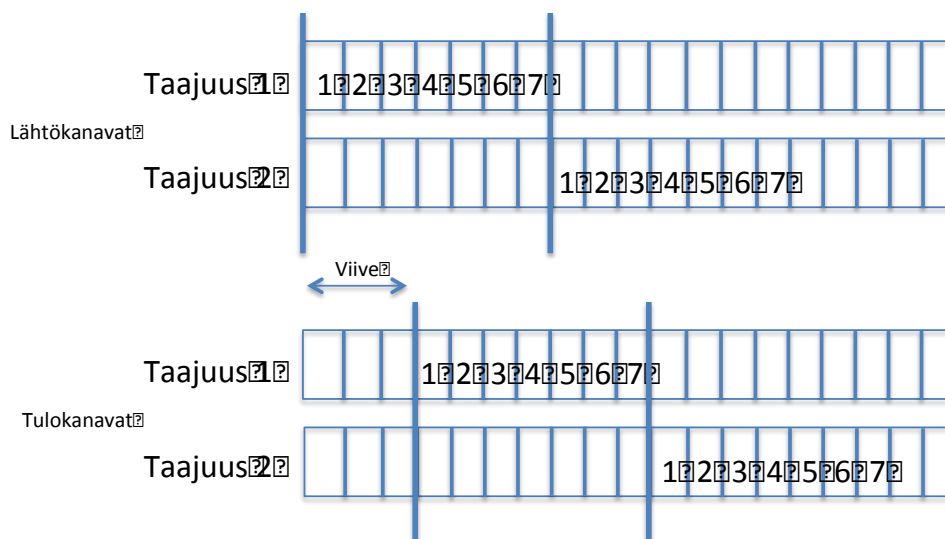
2.4 Kapasiteetti

Kanavajako

GSM-taajuus on jaettu 200 kHz:n leveyden kanaviin. Esimerkiksi GSM-900 -alueesta, jossa on sekä lähtö- että tulotaajuuksina 25 MHz:n taajuusalueet, tulee 124 kanavaa. Nämä kanavat operaattorit jakavat keskenään ja saamallaan kanavilla operaattorin täytyy pysytäkseen rakentamaan oma verkko. Yleensä operaattorien kanava-alueiden väliin jätetään yksi suojakanava, jolla varmistetaan, että operaattorit pystyvät helpommin tekemään taajuussuunnitelmaa omassa verkossaan häiritsemättä toisen verkon toimintaa. [1, s.65.]

Jokainen kanava on jaettu kahdeksaan aikajaksoon, joten nämä kahdeksan aikajaksoa muodostavat TDMA-rakenteen (TDMA frame). MS käyttää samaa aikajaksoa niin lähtö- kuin tulokanavana. Tämän takia lähtökanavat on viivästetty kolmen aikajakson ver-

ran (kuva 5), joten MS:n ei tarvitse lähettää ja vastaanottaa samanaikaisesti. Jokainen aikajakso sisältää 156,25 bittiä ja useita dataryöppyä (data burst). Yhden aikajakson kesto on 576,9 μ s, joten TDMA-rakenne kestää 4,615 ms. [1, s.65.]



Kuva 5. Tulo- ja lähtötaajuuksien viive [1, s.65.].

Loogiset kanavat

Loogiset kanavat on jaettu kahteen ryhmään, signalointiin ja liikenteeseen. Liikennekanavia (TCH, Traffic Channel) käytetään käyttäjän tuoman datakuorman siirtämiseen (puhe- ja dataliikennettä). Niillä ei kuljeteta mitään kontrollointitietoa. TCH-kanavaa voidaan käyttää niin piirikytkentäiseen kuin pakettikytkentäiseen datansiirtoon. Pääsääntöisesti piirikytkentäistä yhteyttä käytetään puheyhteyksille ja pakettimuotoista datan siirtoon. TCH-kanava voidaan allokoida joko kokonaan (full-rate TCH) tai puoliksi (half-rate TCH) yhdelle tilaajalle. [1, s.57–58.]

Signalointikanavat jaetaan lähetyskanavaan (BCH, Broadcast Channels), yleiseen kontrollointikanavaan (CCCH, Common Control Channels) ja dedikoituun kontrollikanavaan (DCCH, Dedicated Control Channels). Yhdensuuntaista BCH:ta BSS käyttää lähettääkseen saman tiedon kaikille matkapuhelimille solussa. CCCH-kanavat ovat monipiste signalointikanavia, joilla hoidetaan yhteydenhallintatoimintoja. Tähän sisältyy dedikoitujen kanavien antaminen ja matkapuhelimen löytäminen. DCCH-kanava on kaksisuuntainen kaksipiste kanava. DCCH-kanavilla päivitetään matkapuhelimen tieto-

ja silloin, kun matkapuhelimella ei ole muuta liikennettä, näitä tietoja ovat esimerkiksi paikannustiedot ja hetkellinen signaalitaso. [1, s. 58–60.]

Kanavien jako aikajaksossa ja puhe kapasiteetin määrä

Koska yksi kanava pitää sisällään kahdeksan aikajaksoa, täytyy signalointi ja liikenne jakaa aikajaksolle. Normaalisti kanavat jaetaan siten, että liikenteelle jää kuusi aikajaksoa. Kapasiteetin lisäämiseksi kaikki signalointi pystytään hoitamaan yhdellä aikajaksolla, jolloin liikenteelle saadaan seitsemäs aikajakso käyttöön. Täysnopeus (Full-rate) puhe vie aina yhden aikajakson, joten parhaimmillaan yhdellä kanavalla pystyy olemaan samanaikaisesti seitsemän puhelua. Ongelmaksi tietenkin tuli kanavien vähäinen määrä ja siitä johtuva verkon ruuhkaisuus. Tämän seurauksena kehittyi tekniikka siten, että samalla aikajaksolla pystyi hoitamaan kaksi puhetta, joten yhden kanavan kokonainen puhemäärä tuplaantuu. Tätä kutsutaan puolinopeus (Half-rate) puheeksi. Yleisesti käytettävissä oleva liikenne yleensä katsotaan Erlangin B-taulukosta, jossa on otettu huomioon operaattorin hyväksymä esto. Jos kapasiteettia tarvitaan lisää, on uusi kanava otettava käyttöön. [2; 3, s. 237–238.]

GPRS-kapasiteetti

Yhdessä aikajaksossa pystytään lähettämään joko piirikytkettyä tai pakettikytkettyä dataa. Puhetta (piirikytkentäinen) ja dataa (pakettikytkentäinen) ei siis pystytä lähettämään samassa aikajaksossa. Jos verkkosuunnitelmassa halutaan varmistaa, että datasiirto tulee onnistumaan, yksi tai useampi aikaväli voidaan määritellä puhtaasti pakettikytkentäiseen datan siirtoon. Yhdellä aikavälillä lähtee neljä kahdenkymmenen millisekunnin datapursketta. Datapurskeen kesto on vakio, mutta koodausjärjestelmä ja modulointi vaihtelevat, josta seuraa saatavat datanopeudet. Saatava datanopeus riippuu saatavilla olevista aikaväleistä, käytettävästä koodaus järjestelmästä GPRS-datassa (Coding Schemes, CS) tai käytettävästä modulointi- ja koodausjärjestelmästä (Modulation and Coding Schemes, MCS) EGPRS datassa. Se, mitä CS:ää tai MCS:tä käytetään, riippuu siitä, tukeeko tukiasema ja matkapuhelin EGPRS:ää vai käytetäänkö tavallista GPRS:ää, ilmarajapinnan laadusta ja käyttäjän etäisyydestä tukiasemaan. Mitä vähemmän virheenkorjausta tarvitaan, sen nopeampiin yhteyksiin päästään. [2; 3, s. 237–238.]

GPRS:ssä on neljä CS:ää, jotka on numeroitu CS-1:stä CS-4:ään. Taulukosta 1 näkee, että CS-1:ssä varsinaisten data bittien määrä on 181, koska datapurske on 20 ms pitkä, siitä seuraa CS-1:hen datanopeudeksi 9,05 kbit/s. [1, s.255–257; 2.]

Taulukko 1. GSM-datan laskenta [1, s.256].

Koodaus järjestelmä	Esikoodatut USF	Info bitit ilman USF ja BCS	Pari-teetti bitit BCS	Loppu bitit	Ulostulos konvolutiivisen kooderin	Punctured bit (P(bit))	Koodaus taso	Data nopeus (kbit/s)
CS-1	3	181	40	4	456	0	$\frac{1}{2}$	9,05
CS-2	6	268	16	4	588	132	$\sim \frac{2}{3}$	13,4
CS-3	6	312	16	4	676	220	$\sim \frac{3}{4}$	15,6
CS-4	12	428	16	-	456	-	1	21,4

EGPRS tuo mukanaan moduloinnin. GPRS:ssä sinänsä käytetään GMSK-modulointia, jossa yksi symboli sisältää yhden bitin. EGPRS tuo mukanaan 8-PSK:n jossa yksi symboli pitää sisällään kolme bittiä. Kuten taulukosta voi huomata, CS-1-4 sisältää vähemmän informaatiobittejä kuin CS-1-4, joten samalla datanopeus on pienempi. Toisaalta hyvissä radio-olosuhteissa EGPRS-tekniikalla käytetään 8-PSK modulointia, jolloin datanopeus on parempi kuin GPRS-tekniikassa. [1, s.255–257; 2.]

Taulukko 2. EGPRS-datanopeudet EDGE:n laskentaan. [1, s.267].

Koodaus järjestelmä	Modulaatio	RLC blocks/radio block	Infobitti	BSC	Loppu bitit	Koodaus taso	Data nopeus (kbit/s)
MCS-1	GMSK	1	176	12	6	0,53	8,8
MCS-2	GMSK	1	224	12	6	0,66	11,2
MCS-3	GMSK	1	296	12	6	0,85	14,8
MCS-4	GMSK	1	352	12	6	1	17,6
MCS-5	8-PSK	1	448	12	6	0,37	22,4
MCS-6	8-PSK	1	592	12	6	0,49	29,6
MCS-7	8-PSK	2	2x448	2	2x6	0,76	44,8
MCS-8	8-PSK	2	2x554	2	2x6	0,92	54,4
MCS-9	8-PSK	2	2x592	2	2x6	1	59,2

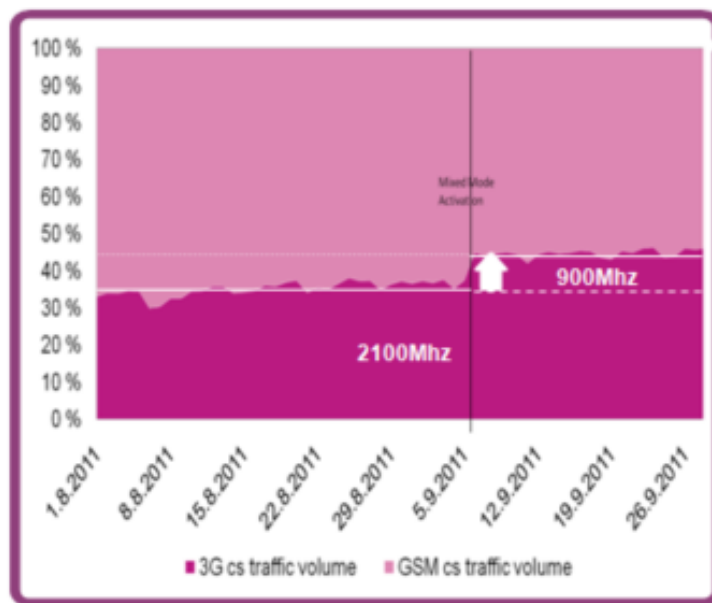
EDGE-tekniikassa on mahdollista käyttää useampaa aikaväliä, jolloin lopullinen tiedonsiirtonopeus on taulukossa 2 esitettyjen nopeuksien kerrannainen. Teoriassa voidaan käyttää jopa kahdeksaa aikaväliä, jolloin tiedonsiirtonopeudeksi saadaan 473,6 kb/s. Tämä tosin on vain teoreettinen nopeus, käytännössä kolme – neljä aikaväliä pystytään käyttämään jolloin tiedonsiirtonopeus jää 236,8 kb/s luokkaan. [1, s.267].

3 UMTS- / WCDMA-verkko

3.1 UMTS-verkot Suomessa

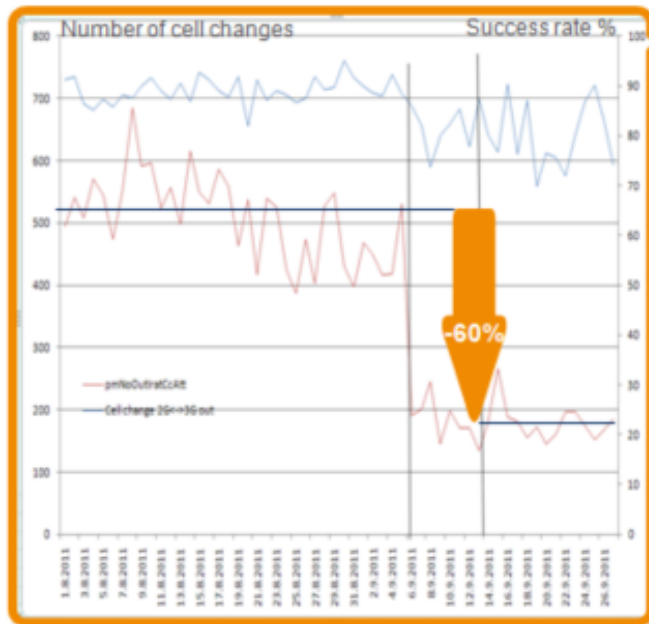
Vuonna 2004 Elisa avasi 3G-verkon kaupalliseen käyttöön. Tällöin verkko toimi pelkästään 2100 MHz:n taajuudella ja sitä rakennettiin vain suuriin kaupunkeihin. Vuonna 2006 ensimmäiset 900 MHz:n taajuudella toimivan UMTS900-verkon avattiin. 900 MHz:n taajuuden ansiosta, 3G-verkko alkoi laajentua haja-asutusalueille. 900 MHz:n taajuus läpäisee paremmin materiaalia, kyseisen ominaisuuden ansiosta sisäpeittoa pystytään parantamaan myös kaupunkialueilla. [6; 7.]

DNA avasi käytännössä yhdessä yössä 900 MHz:n verkon yhden kaupungin alueella, jossa aikaisemmin oli toiminut 2100 MHz:n verkko. 900 MHz:n verkon laajuus vastasi 2100 MHz:n verkkoa, eli pinta-alaltaan verkko ei juurikaan muuttunut. Kuvasta 6 nähdään puheliikenteen jakauma 2G- ja 3G-verkkojen välillä. Pystyviivalla on merkitty kohta, milloin 900 MHz:n verkko otettiin käyttöön. Yksi merkittävimpiä syitä 3G-verkon osuuden kasvuun on 900 MHz:n signaalin penetraatiokyky, jonka ansiosta rakennuksissa olevat käyttäjät saavat helpommin verkon käyttöönsä. [7.]



Kuva 6. 3G-puheen suhde 2G-puheeseen [7.].

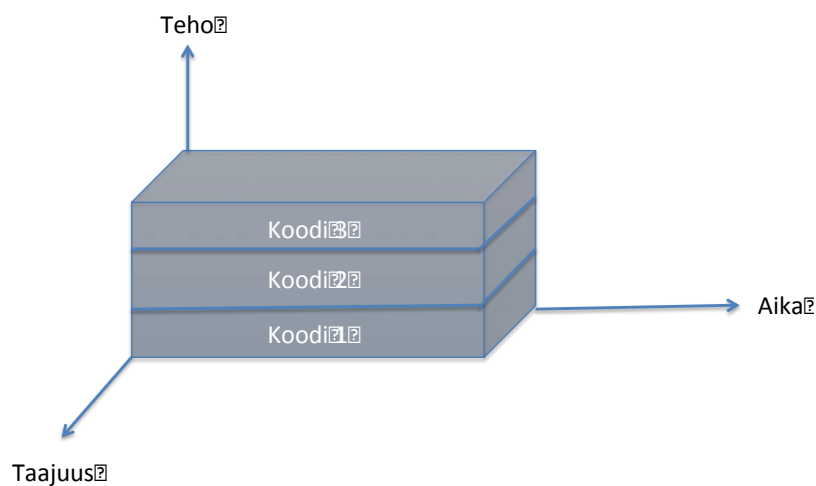
DNA myös tutki 3G-verkosta 2G-verkkoon olevien verkonvaihtojen (handover) määriä kyseisellä alueella. Yleensä verkonvaihtoja 2G- ja 3G-verkkojen välillä tapahtuu, kun matkapuhelin siirtyy 3G-verkossa sellaiselle alueelle, jossa se ei saa enää tarpeeksi hyvää signaalia. Kuvasta 6 voidaan huomata selkeä muutos verkonvaihtojen määrässä. Muutoksen jälkeen 3G-verkosta siirtymisiä 2G-verkon puolelle tapahtui 60 % vähemmän. Samalla voidaan huomata, että onnistumisprosentti aleni, mutta tähän voi vaikuttaa tukiasemien konfiguraatiot, mm. naapuruusmäärittelyt. Onnistumisprosentti on pidemmällä aikavälillä parantunut, kun verkkoa on optimoitu paremmin. [7.]



Kuva 7. Verkonvaihtojen määrä ja onnistumisprosentti [7.]

3.2 Koodijakokanavointi, (W)CDMA

Koodijakokanavointi järjestelmät ovat laajakaista järjestelmiä. Käyttäjä saa käyttöönsä koko kaistanleveyden, kuten TDMA:ssa, koko yhteyden ajaksi, kuten FDMA:ssa. Tosin käyttäjä ei saa taajuutta käyttöönsä yksin, vaan kaikki solun käyttäjät käyttävät samaa taajuutta (kuva 8). Jotta käyttäjät voidaan erottaa, jokaiselle käyttäjälle annetaan ortogonaalinen koodi. [1, s. 17–18.]



Kuva 8. CDMA [1, s.17–18.].

3.3 Verkon rakenne

Käyttäjän laite

Käyttäjän laite (UE, User Equipment) sisältää kaksi osaa, mobiililaitteen ja USIM:n. Näiden kytkös toisiinsa ja muuhun verkkoon näkyy kuvassa 9. Mobiililaitte tässä yhteydessä tarkoittaa matkapuhelinta tai muuta matkapuhelinverkkoa hyödyntävää laitetta. USIM on älykortti, joka pitää sisällään käyttäjätietoja. USIM hoitaa todentamisalgoritmit ja se säilyttää todennus- ja salausavaimet avaimet. SIM-kortti on jo tuttu GSM:stä, mutta USIM:iin on tullut lisää ominaisuuksia. [4, s.68–72.]

UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)

UTRAN sisältää verkkoelementeistä NodeB:n, joka on käytännössä tukiasema ja radioverkkokontrollerin (RNC, Radio Network Controller). Näiden kytkös toisiinsa ja muuhun verkkoon näkyy kuvassa 9. NodeB:n tehtävä on muuttaa data lub ja Uu rajapintojen välillä, eli mobiililaitteelta RNC:lle. NodeB:n tärkein tehtävä on hallita ilmarajapinnan L1-prosesseja, kuten kanava koodaus. NodeB myös hallitsee muutamia RRM-operaatioita (Radio Resource Management), kuten virranhallinta. Nimitys NodeB oli alun perin työnimi standardointia tehdessä, mutta nimeä ei lopulta lähdetty muuttamaan. GSM-verkossa NodeB:tä vastaa BTS. [4, s.68–72.]

RNC on vastuussa radio resurssien kontrolloinnista UTRAN:in sisällä. RNC on yhteyspiste kaikille palveluille, joita UTRAN tarjoaa CN:ssä, esimerkiksi yhteyden hallinta mobiililaitteelle. RNC on liitettyä CN:n, yleensä yhteen SGSN:n ja yhteen GGSN:n, RNC myös päättää RRC protokollan joka määrittelee viestit ja prosessit mobiililaitteen ja UTRAN:nin välillä. RNC vastaa GSM tekniikassa BSC:tä. [4, s.68–72.]

RNC joka kontrolloi yhtä NodeB:tä kutsutaan CRNC:ksi (Controlling RNC). CRNC on vastuussa kuorma ja estokontrollista soluissa, CRNC hoitaa myös pääsyn hallinnan ja koodi allokoinnin uusille radio linkeille joita luodaan kyseisille soluille. [4, s.68–72.]

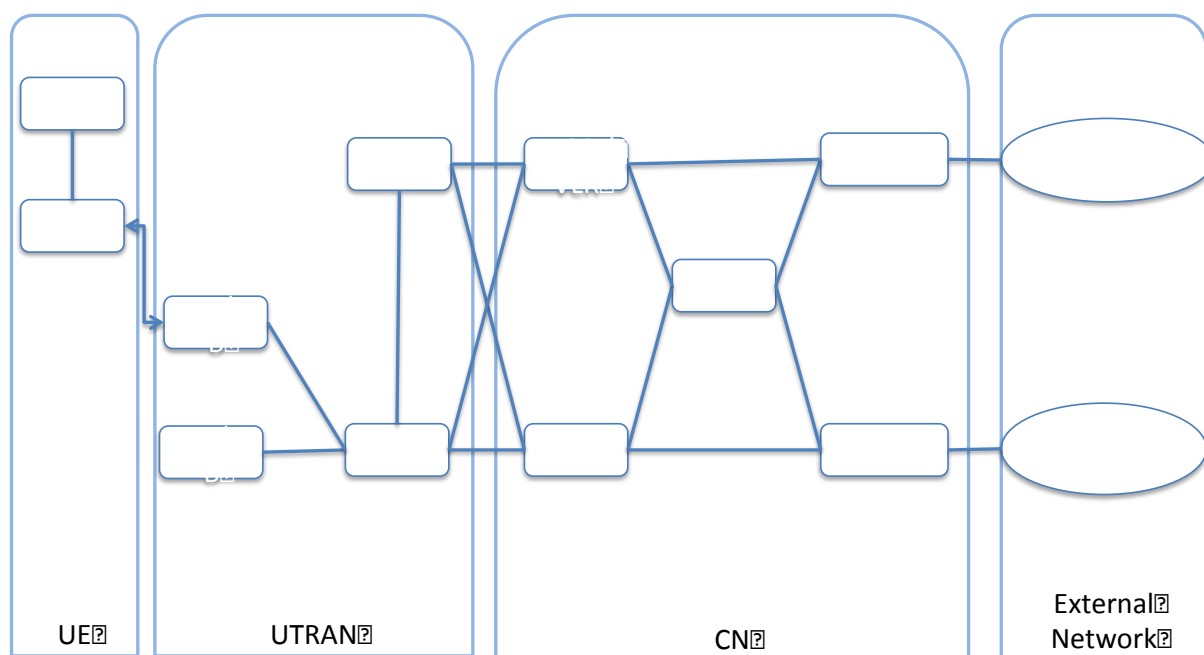
Runkoverkko (CN, Core Network)

CN pitää sisällään HLR:n MSC/VLR:n GMSC:n, GGSN:n sekä SGSN:n. Näiden kytkös toisiinsa ja muuhun verkkoon näkyy kuvassa 9. Gateway MSC (GMSC) on kytkin mihin UMTS PLMN on kytketty erilliseen CS-verkkoon. Kaikki sisään- ja ulosmenevän CS-

yhteydet kulkevat GMSC:n kautta. Muuten verkon muut osat ovat esitelty jo GSM:ssä. [4, s.68–72.]

Ulkoiset verkot

Ulkoiset verkot jaetaan kahteen eri ryhmään, piirikytkentäiseen (CS) ja pakettikytkentäiseen (PS). ISDN- ja PSTN-verkot ovat piirikytkentäisiä, kun taas esimerkiksi internet on pakettikytkentäinen. [4, s.68–72.]



Kuva 9. UMTS-verkko

3.4 Kapasiteetti

Puhe

UMTS:ssä puhekoodekit käyttävät AMR (Adaptive Multi-Rate) -tekniikkaa. AMR voi käyttää kahdeksaa eri bittinopeutta: 12,2 (GSM-EFR), 10,2; 7,95; 7,40 (IS-641); 6,70 (PDC-EFR); 5,90; 5,15 ja 4,75 kbps. AMR:n bittitasoa RAN pystyy säätämään riippuen ilmatien laadusta ja ruuhkaisuudesta. Kun liikennettä on paljon, esimerkiksi kiiretunnin aikana, RAN voi säätää heikomman AMR-bittitason, jolloin saadaan enemmän kapasiteettia, mutta puheen laatu heikkenee. AMR-puhekoodekkia pystytään vaihtamaan 20 ms:n välein. AMR on suunniteltu GSM-verkolle EDGE-laajennuksessa käytettäväksi. Jos radiokanavalla on paljon häiriöitä, virheenkorjaukseen käytettävien bittien määrää

pystytään kasvattamaan, jolloin puheensiirtoon käytettyjen bittien määrä pienenee. Tämä aiheuttaa, että puheen laatu huononee, mutta puheen katkeamisilta pystytään välttymään. [4, s.10–11.]

3G-verkossa on myös mahdollista käyttää laadukkaampaa puhekoodekkia, jota kutsutaan ARM-WB:ksi (Adaptive Multi-Rate Wideband). Kyseinen puhekoodekki välittää jopa 50–7000 Hz puhekaistan, kun aikaisemmat ovat välittäneet vain 300–3400 Hz. ARM-WB voi käyttää yhdeksää eri bittinopeutta väliltä 6,60–23,85 kb/s. ARM-WB:tä käyttämällä puhelaatu kasvaa siinä määrin, että puhelimen välityksellä tutut henkilöt voivat selkeästi tunnistaa toisensa äänen perusteella. Samalla myös puhelun osapuolet saavat paremmin selvää taustalta tulevista häiriöäänistä, jolloin pystytään arvaamaan paremmin minkälaisessa fyysisessä ympäristössä vastapuoli on.

Kapasiteetin laskeminen

Ortokonaalisten koodien määrä yhdellä salauskoodilla on rajoitettu. Koodien rajallinen määrä määrittelee rajan tukiasemalta mobiiliin päin olevalle kapasiteetille, jos ilmatie on hyvänlaatuinen ja verkonsuunnittelu ja verkossa olevat komponentit tukevat suurempaa kapasiteettia. Yleisille kanaville, sekä kahden tukiaseman solujen välisille vaihdolle ja saman tukiaseman kahden eri solun välisille vaihdoille (soft ja softer handover) täytyy varata osa ortogonaalisista koodeista. Taulukon 4 laskennassa käytetyt Holman ja Toskalan määrittelemät oletusarvot näkyvät taulukossa 3. Salauskoodeja kasvattamalla kapasiteettia saadaan lisää, mutta laskennassa käytetään oletusta, että on vain yksi salauskoodi käytettävissä.

Taulukko 3. Oletukset UMTS-kapasiteetin laskennassa [4, s. 316].

Yleiset kanavat	10 koodia jossa levitys tekijä on 128
Soft handover ylitys	20 %
Levitys tekiä half rate puheelle	256
Levitys tekiä full rate puheelle	128
Bittinopeus	3,84 Mbps
Modulaatio	QPSK (2 bittiä symbolissa)
Keskimääräinen DPCCH ylitys datalle	10 %
Kanava koodaus suhde datalle	1/3 30 % läpi menemisellä.

Taulukko 4. UMTS-puhekapasiteetin laskenta [4, s. 316].

Puhe, full rate (AMR 12,2kbps ja 10,2kbps)	128 kanavaa	Koodien määrä kun levitys tekiä on 128
	$*(128-10)/128$	Common channel ylitys
	/1,2	Soft handover ylitys
	= 98 kanavaa	
Puhe, half rate (AMR <= 7,95 kbps)	2*98 kanavaa = 196 kanavaa	Levitys tekijä on 256

Taulukko 5. UMTS-datakapasiteetin laskenta [4, s. 316].

Paketti data	$3,84 * 10^6$	Bittinopeus
	$*(128-10)/128$	Common channel ylitys
	/1,2	Soft handover ylitys
	*2	QPSK modulointi
	*0,9	DPCCH ylitys
	/3	1/3 suhde kanava koodauksessa
	/((1-0,3))	30 % puncturing
	=2.5 Mbps	

Kun oletuksena on taulukoiden 3, 4 ja 5 kohdat, voidaan todeta, että maksimimäärä täysnopeuspuhekanavia sektorille on 98 ja maksimi datan läpipääsy on 2,5 Mbps sektorille. Taulukon 5 laskenta voidaan esittää yhdellä rivillä numeroarvoilla seuraavasti:

$$\text{Datan läpipääsy} = 3,84 * 10^6 * \frac{\frac{128-10}{128}}{1,2} * 2 * \frac{0,9}{1-0,3} = 2528571,43 \cong 2,5 \text{ Mbps} \quad [4. \text{ s. } 315-317.]$$

Taulukko 6. Datan maksimikokonaishäviö [4. s. 188].

Suoritusteho (käyttäjät * bittinopeus * (1 – eston virheprosentti) $N \cdot R \cdot (1 - \text{BLER})$ (kbps)	Kuormitusaste $\bar{\eta}_{DL}$ (%)	Keskiarvoinen kokonaishäviö L (dB)	Maksimi kokonaishäviö (dB)
100	12	170,7	176,7
200	25	167,1	173,1
300	37	164,5	170,5
400	50	162,3	168,3
500	62	160,1	166,1
600	74	157,7	163,6
700	87	154,1	160,1
800	99	142,1	148,1
808	100 = maksimikapasiteetti	-	-

Taulukossa 6 Holma ja Toskala ovat laskeneet häiriöiden ja häviöiden vaikutusta säävutettavaan datanopeuteen. Häiriöt ja häviöt on Holman ja Toskalan arvioita. Mitä pidemmällä ollaan tukiasemasta, sitä enemmän häviötä syntyy. Datassa päästään noin 700 kb/s, kun taas Holman ja Toskalan mukaan puheessa saadaan 66 käyttäjään 12,2 kbps AMR-koodekkia käytettäessä. Tässä on koetettu ottaa huomioon se, että käyttäjät eivät ole täysin tukiaseman vieressä, joten häviötä tulee enemmän. Etäisyys tukiasemasta riippuu alueen rakenteesta, joten metrimääriä ei kannata lähteä arvioimaan. Enemmän puheikäyttäjiä yhdelle solulle saadaan vähentämällä AMR:n bittinopeutta pienemmäksi tai tekemällä solut pienemmiksi. [4. s. 184–190; 4. s. 319.]

High Speed Packet Access (HSPA)

High Speed Packet Access (HSPA) voidaan jakaa laskevaan siirtotiehen (High Speed Downlink Packet Access, HSDPA) ja nousevaan siirtotiehen (High Speed Uplink Packet Access, HSUPA) suuntiin. HSDPA:n mahdollistamiseksi uusi liikennekanava High Speed-Downlink Shared Channel (HS-DSCH) täytyi määritellä. HS-DSCH pitää sisällään kolme fyysistä kanavaa: High Speed-Shared Control Channel (HS-SCCH)

ilmoittaa käyttäjälle, että dataa tullaan lähettämään, High Speed-Dedicated Physical Control Channel (HS-DPCCH) kuljettaa acknowledge/not acknowledge (ACK/NACK) -tiedot ja kanavan laadulliset tiedot, High Speed-Physical Downlink Shared Channel (HS-PDSCH) toimii varsinaisen datan siirtäjänä. HS-DSCH kanava on jaettu useamman käyttäjän kanssa. Tämän lisäksi fyysisen kanava on 2ms pituinen. HSDPA:ssa käytetään QPSK-, 16QAM- ja 64QAM-modulointia. QPSK-moduloinnilla on viisi koodia allokoitu saadaan huippusiirtonopeus 1,8 Mbit/s, kun taas 16QAM samalla määrällä koodeja saavuttaa huippusiirtonopeuden 3,6 Mbit/s. HSPDA:lla aluksi pystyttiin teoreettisesti saavuttamaan siirtonopeus 21,1 Mbit/s, tällöin käytössä on 64QAM-modulointi ja 15 koodia.

Myöhemmin HSDPA-laajennuksessa tuli mahdolliseksi käyttää kahta kantoaaltoa. Tätä menetelmää kutsutaan Dual-Carrieriksi (jossain kirjallisuudessa Dual-Cell) ja se on ns. HSPA+ tekniikkaa. Perusidea on lähettää tietoa kahden kantoaallon kautta, jolloin tiedonsiirtonopeus kasvaa. Kun käytetään kahta kantoaaltoa, 64QAM-modulointia ja käytössä on 15 koodia, saadaan siirtonopeudeksi 42,2 Mbit/s. Kuten voi huomata, niin kahden kantoaalloa käyttämällä kaksinkertaistetaan nopeus yhteen kantoaalltoon verrattuna. Tätä tekniikkaa osa operaattoreista jo kutsuu 4G-termillä, vaikka se on vain laajennus olemassa olevaan tekniikkaan.

Toinen tapa kaksinkertaistaa nopeus on käyttää useampaa antennia lähetykseen ja vastaanottamiseen. Tätä kutsutaan MIMO:ksi (Multiple input – Multiple output). Kun käytössä on kaksi kantoaaltoa ja MIMO, saadaan tuplattua kahdella kantoaallolla saatu nopeus ja tulokseksi tulee 84,4 Mbit/s. Tämän jälkeen tiedonsiirtonopeuden kasvattamiseksi pitää alkaa käyttää useampia kantoaaltoa.

Teoriassa verkko voi jakaa nämä nopeudet haluamallaan tavalla eri käyttäjille tai antaa koko kapasiteetin vain yhdelle. Samalla voidaan varmistaa se, että käyttäjien eri kategoriset laitteet saavat palvelua verkolta.

HSUPA on tehty vastaavalla tavalla kuin HSDPA. HSUPA käyttää E-DCH-kanavaa. Suurempana erona on kategorioiden määrä. HSUPA:n suurin tiedonsiirto määrä on 5,76 Mbit/s ja laajennuksella, jossa käytetään kahta kantoaaltoa, voidaan teoriassa saavuttaa 23 Mbit/s:n siirtonopeus. Käytännössä tällä hetkellä uusimmat matkapuhelimet tukevat 5,76 Mbit/s:n siirtonopeutta.

4 LTE-verkko

4.1 LTE Suomessa

Sonera avasi ensimmäisen LTE (Long Term Evolution) -testiverkon Suomessa kesäkuussa 2010 Turkuun. Sonera ilmoitti saavuttaneensa siirtonopeuden 47 Mbit/s, tosin Sonera uskoi ettei kaupallisessa verkossa tulla kyseistä nopeutta saavuttamaan. Kuluttajille operaattorit avasivat LTE-verkot 2011, vaikka avausvaiheessa ei juurikaan LTE-tukevia laitteita ollut. [6.]

4.2 Ortogonaalinen taajuusjakokanavointi

Ortogonaalinen taajuusjakokanavointi (OFDM) perustuu tiedon siirtoon yhtäaikaisella useilla toisia häiritsemättömillä taajuuskanavilla. Menetelmä perustuu diskreettiin Fourier-käänteismuunnokseen, jossa kerralla moduloitava symboli vastaa kompleksilukuna esitettyä taajuuksien voimakkuuksia ja vaihekulmia. Tämä muutetaan diskreetillä Fourier-käänteismuunnoksella digitaalisen signaalin vaihteluksi.

OFDM perustuu taajuusjakoiseen multipleksointiin, joka käyttää useita taajuuksia rinnakkain. OFDM:ssä alitaajuudet ovat osittain päällekkäin, jolloin saadaan samaan taajuuskaistaan huomattavasti enemmän tietoa. [4. s. 467–470]

4.3 Verkon rakenne

LTE-verkon rakenne jaotellaan neljään ylempään tasoon, jotka ovat UE (User Equipment), E-UTRAN (Evolved-UTRAN), EPC (Evolved Packet Core Network) ja palveluihin. E-UTRAN koostuu eNodeB:stä eli tukiasemista. EPC tarkoittaa kytkentäverkkoa, siihen kuuluu Mobility Management Entity (MME), Serving Gateway (S-GW), Packet Data Network Gateway (P-GW), Policy and Charging Resource Function (PCRF) ja Home Subscription Server (HSS). Nämä on kuvattu seuraavissa kappaleissa ja kuvassa 10 näkyy näistä koostuva verkko. [5, s. 23–35.]

Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network

Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (EUTRAN) pitää sisällään eNodeB:t. eNodeB hallitsee kaikkea radiotien toimintoja kiinteän verkon ja käyttäjän laitteen välillä. eNodeB hoitaa salauksen ja sen purkamisen. Tämän lisäksi eNodeB hoitaa IP-otsikon pakkaamisen ja purun, jolloin vältetään toistuvasti lähettämästä samaa tai peräkkäistä dataa. eNodeB hoitaa myös useita Control Planen (CP) toimintoja, kuten on vastuussa RRM:stä (Radio Resource Management). Tämä tarkoittaa sitä, että eNodeB hallitsee resurssien allokoinnin riippuen pyynnöistä, priorisoinnista, QoS-perusteisen palvelun tarjoamisen ja jatkuvan monitoroinnin resurssien käyttöasteesta. Tämän lisäksi eNodeB hoitaa tärkeää roolia MM:ssä (Mobility Management). eNodeB kontrolloi ja analysoi päätelaitteen tekemää radioverkon signaalivoimakkuuden mittauksia, tekee vastaavanlaisia mittauksia itse ja näiden pohjalta päättää päätelaitteen siirrosta toiseen soluun (handover). Päätelaite saattaa tämän yhteydessä siirtyä toisen eNodeB:n hallintaan, joten eNodeB:n täytyy myös hoitaa signalointi toisen eNodeB:n ja MME:n kanssa. eNodeB hoitaa myös uuden päätelaitteen pyynnön ohjauksen MME:lle, jonka alla päätelaite oli aikaisemmin tai ohjaa signaloinnin uudelleen MME:lle, jos reitti edeltävälle MME:lle ei ole saatavilla tai reititystieto on puutteellinen. [5, s. 23–28.]

Evolved Packet Core (EPC)

MME (Mobility Management Entity) on päähallintaelementti EPC:ssä. MME:n päätehtävät ovat todennus ja turvallisuus, liikkuvuuden hallinta, liittymäprofiileiden hallinta sekä palveluliitettävyys. MME on ensimmäinen rajapinta 2G- ja 3G-verkkoihin ja MME vastaa SGSN:n handover valinnasta LTE ja 2G/3G-verkkojen välillä. [5, s. 28–29.]

Kun UE ottaa yhteyttä verkkoon, sen todellinen identiteetti tarkistetaan. MME voi tehdä tarkistuksen myös tarvittaessa tai tietyn aikavälin jälkeen. Todennuksessa voidaan pyytää UE:n kotirekisteristä todennusvektorit, jotka pitävät sisällään todennushaasteen. Haaste lähetetään UE:lle ja vastausta verrataan kotirekisteristä saatuun vastaukseen. UE:n turvallisuudeksi MME allokoii jokaiselle UE:lle oman väliaikaisen identiteetin, jota kutsutaan GUTI:ksi (Globally Unique Temporary Identity). Tämän avulla IMSI:n (International Mobile Subscriber Identity) lähetystä voidaan minimoida. GUTI voidaan allokoida uudelleen tietyn aikajakson jälkeen estäämään luvaton UE:n jäljittämistä. [5, s. 28–29.]

Liikkuvuuden hallinnassa (Mobility Management Entity, MME) pitää yllä UE:n lokaatiota sen palvelualueella. Kun UE ottaa yhteyttä verkkoon, MME rekisteröi sen ja lähettää tiedon UE:n omalle HSS:lle. Kun UE on aktiivisessa yhteydessä verkkoon, MME seuraa sen liikkeitä eNodeB:n tasolla. Kun UE menee IDLE tilaan, seuranta on S-GW-tasolla. Tällöin ei tarvita tarkkaa tietoa UE:n sijainnista. MME:lle tulee kaikki eNodeB:n muutokset, koska verkossa ei ole erillistä radioverkkokontrolleria (Radio Network Controller, RNC) hallinnoimaan UE:n liikkumista. IDLE-tilassa oleva UE päivittää sijaintinsa tietyn ajan jakson jälkeen, tai kun se liikkuu uudelle seuranta-alueelle (Tracking Area, TA). [5, s. 29.]

Liittymäprofiilien hallinnassa ja palveluliikkuvuudessa MME ottaa vastaan liittymän profiilin sen kotiverkosta. MME säilyttää tämän tiedon niin kauan kuin UE on MME:n palvelualueella. Profiili määrittelee, mitä pakettidatayhteyksiä sen kuuluu allokoida UE:lle verkon puolelta. MME määrittelee automaattisesti normaalit IP-liitännät. Tämä pitää sisällään CP (Control Plane) -signaaloinnit eNodeB:hen ja S-GW:lle (Serving Gateway). Myöhemmin MME saattaa joutua määrittelemään profiilia uudelleen, jos tarvetta ennalta määräämättömille yhteyksille tulee. [5, s. 29.]

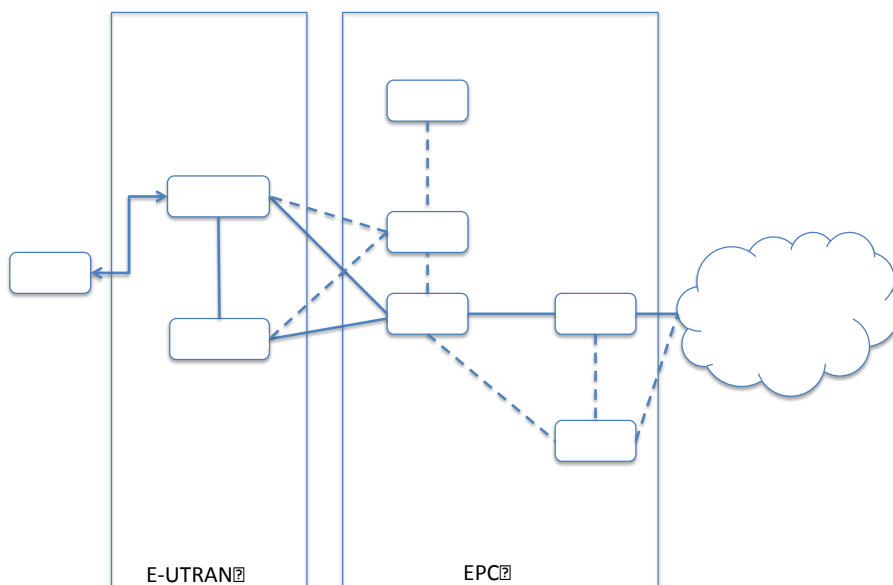
S-GW:n (Serving Gateway) tehtävä on UP-tunnelin hallinta ja kytkentä. Kaikki UE:n IP-paketit kulkevat S-GW:n kautta. S-GW vastaa ainoastaan omista resursseista ja allokoi niitä MME:n, P-GW:n tai PCRF:n pyyntöjen mukaan. Jos allokointipyyntö tulee P-GW:ltä tai PCRF:ltä, niin S-GW lähettää tiedon MME:lle, jotta MME osaa kontrolloida tunnelia eNodeB:lle. [5, s. 29–30.]

Kun UE menee IDLE-tilaan, resurssit eNodeB:ltä vapautetaan ja siirtotie terminoidaan S-GW:lle. Jos P-GW:ltä tulee dataa UE:n suuntaan, S-GW puskuroi datan ja pyytää MME:n aloittamaan UE:n haun. Haun seurauksena UE muodostaa uudelleen aktiivisen yhteyden verkkoon ja kun tunneli on uudelleen luotu, voidaan puskuroidut paketit lähettää UE:lle. [5, s. 29–31.]

P-GW (Packet Data Network Gateway) -reititin EPC:n ja ulkoisen pakettidataverkon välillä. Yleisesti P-GW allokoi IP-osoitteen UE:lle, jota UE käyttää yhteydenotossa muihin IP-palveluihin, kuten internetiin. P-GW seuraa myös datavirtaa laskutuksen ja telekuuntelutietojen takia. [5, s. 31–32]

PCRF (Policy and Charging Resource Function) hallitsee policy ja laskutustietoja. PCRF tekee päätökset, millaista palvelua UE saa riippuen QoS:ista. [5, s. 32–33.]

HSS (Home Subscription Server) on tietokanta, johon tallennetaan tilapäinen tieto käyttäjästä. Sinne tallennetaan myös paikkatietoa. HSS:ssä on tieto käyttäjän saamista palveluista, joita on muun muassa tieto, mitä PDN-yhteyksiä käyttäjä saa, saako käyttäjä verkkovierailia tietyn ulkomaisen operaattorin verkossa. [5, s. 34.]



Kuva 10. LTE-verkon rakenne [5, s. 23–35.].

4.4 Puhe LTE-verkossa

LTE-verkossa puhe kulkee aikaisemmista tekniikoista poiketen IP:nä (VoIP, Voice over IP). VoIP tuo mukanaan tiettyjä vaatimuksia, jotka ovat olleet aikaisemmin helposti toteutettavissa. Näitä vaatimuksia ovat muun muassa puheen korvasta korvaan kestävä aika, jonka tulee olla minimissään 280 ms, jotta latenssi ei tunnu liian häiritsevältä. Jotta puheen latenssi olisi miellyttävällä tasolla, sen tulisi olla alle 200 ms. Aikaisemmillä tekniikoilla on puhekatkoissa päästy jopa alle 0,3 %:n tasolle, joka ei VoIP-tekniikalla saa alentua. Puheessa käytetty AMR on 12,2 kb/s, jonka paketti koko on 31 bittiä, IP-otsikko on 40–60 bittiä, tämän takia IP otsikon täytyy pakata. Puheen pakkausta tehdään sekä NodeB:ssä, että UE:ssa, jotta se on tehokasta. [7.]

Tällä hetkellä ainakaan DNA:n verkossa ei puhetta käytettä LTE-verkossa. Kun LTE-verkossa olevalle matkapuhelimelle on tulossa puhelu, lähettää verkko puhelimelle asiasta tiedon ja puhelin vaihtaa 2G- tai 3G-verkkoon. Näin palvelu saadaan luotua, eikä IP:n päällä toimivan ominaisuuden haasteista tarvitse välittää. Tätä toiminnetta kutsutaan termillä CSFB (Circuit Switched Fallback) [7.]

4.5 Kapasiteetti

LTE tarjoaa korkeita huippubittinopeus käyttämällä korkeaa kaistanleveyttä (jopa 20MHz), 64QAM-modulointia ja moniantenni lähetystä (MIMO). [5. s. 213–215.]

QPSK-moduloinnilla voidaan lähettää 2 bittiä symbolissa, 16QAM:ssa 4 bittiä symbolissa ja 64QAM:ssa 6 bittiä symboli. 2x2 MIMO tuplaa huippubittinopeuden 12 bittiin symbolilta. Täten QPSK-puolikoodauksella (half rate coding) kuljettaa 1 bps/Hz, kun taas 64QAM ilman koodausta ja 2x2 MIMO:lla kuljettajaa 12 bps/Hz. Taulukon 7 laskennassa oletetaan, että fyysinen kontrollikanava (PDCCH) vie yhden symbolin käytävissä olevasta 14 symbolista, laskevan siirtotien referenssi signaali (RS) käyttää 2 symbolia 14:sta joka kolmannella alikantoaallolla. Kun edellä olevat oletukset otetaan huomioon voidaan huomata taulukosta 7, että teoreettinen datanopeus on noin 172 Mb/s, jos 4x4 MIMO on käytävissä voidaan saada jopa 325 Mbps. Taulukon 7 lueumat ovat teoreettisia arvoja, jotka voitaisiin saavuttaa täydellisissä olosuhteissa. Kuitenkin voidaan todeta, että LTE:lle määritelty tavoite 100 Mb/s on saavutettavissa. [5. s. 213–215.]

Taulukko 7. LTE:ssä saavutettavat teoreettiset nopeudet [5, s. 214.].

Modulointi ja koodaus	Bittien/Symboli	MIMO:n käyttö	1.4MHz	3.0MHz	5.0MHz	10MHz	15MHz	20MHz
QPSK 1/2	1	Yksittäinen	0.8	2.2	3.7	7.4	11.2	14.9
16QAM 1/2	2	Yksittäinen	1.5	4.4	7.4	14.9	22.4	29.9
16QAM 3/4	3	Yksittäinen	2.3	6.6	11.1	22.3	33.6	44.8
64QAM 3/4	4.5	Yksittäinen	3.5	9.9	16.6	33.6	50.4	67.2
64QAM 1/1	6	Yksittäinen	4.6	13.2	22.2	44.7	67.2	89.7
64QAM 3/4	9	2x2 MIMO	6.6	18.9	31.9	54.3	96.7	129.1
64QAM 1/1	12	2x2 MIMO	8.8	25.3	42.5	85.7	128.9	172.1
64QAM 1/1	24	4x4 MIMO	16.6	47.7	80.3	161.9	243.5	325.1

Päätelaitteen saama datanopeuteen vaikuttaa myös päätelaitteen kyky vastaanottaa ja lähettää dataa. Päätelaitteet on jaettu viiteen kategoriaan, kategoria 1 – kategoria 5. Kategoriassa 1 maksimibittinopeus on 10 Mbps laitteelle päin ja laitteelta verkkoon 5

Mb/s. Kattegoria 5:n laitteiden maksimibittinopeus on 300 Mb/s laitteelle päin ja laitteesta verkkoon 75 Mb/s. [5. s. 213–215.]

Puhekapasiteetin laskemisessa oletetaan, että kontrollikanavan elementtejä (CCE, Control Channel Elements) on 20 kappaletta 5 MHz:n kaistanleveydellä. Kanavia voi olla kaksi, neljä tai kahdeksan CCE:t voi olla yhteenlaskettu käyttäjälle riippuen kanavan laadusta. Laskennassa oletetaan, että puheaktiivisuus on 50 %, puhepaketit saapuvat 20 ms:a, laskevan siirtotien puheensuhde on 50 % ja uudelleenlähetys tarve on 20%. Seuraavalla kaavalla voimme laskea VoIP:in maksimikapasiteetin. Layerilla 1 voidaan VoIP-paketteja niputtaa yhteen lähetystä varten. Näin voidaan saada enemmän käyttäjiä verkkoon, mutta tällöin käyttäjien pitäisi olla hyvällä verkonpeitolla. Paketin niputtaminen voi olla käytetyssä kaavassa arvoltaan 1 tai 2. [5, s. 263–265]

$$\begin{aligned} \text{Maksimikäyttäjät} &= \frac{\#CCE}{\#CCE \text{ per käyttäjä}} * \frac{\text{Puhepakettien saapuminen}}{\text{Puheaktiivisuus}} * \text{Paketti niputtaminen} * \\ &\text{Downlink suhde} * \frac{1}{1+BLER} \end{aligned} \quad (5)$$

Kun yllä olevat oletukset sijoitetaan kaavaan, saadaan 5 MHz kaistanleveydelle

$$\text{Maksimikäyttäjät} = \frac{20}{1} * \frac{20}{0,5} * 1 * 0,5 * \frac{1}{1 + 0,2} \approx 333 \text{ käyttäjää}$$

4.6 LTE-Advanced

LTE:n seuraavaa kehitysvaihetta kutsutaan nimellä LTE-Advanced. Siinä verkkoa rakennetaan pienistä soluista kokonaisuutta, joissa kaistaleveys on jopa 100 MHz. Kyseinen kaistanleveys saadaan keräämällä viisi 20 MHz:n taajuuskaistaa yhteen. Downlink ja uplink suuntaan kerättyjen taajuuskaiston määrä voi olla eri, kuitenkin siten, että uplink suuntaan on aina vähemmän taajuuskaistoja kerättynä. Modulointina käytetään 128QAM:ää ja tietoa lähetetään ja vastaanotetaan jopa kahdeksasta antennista (MIMO Multiplexing). LTE-Advancella pitäisi pystyä saamaan teoriassa jopa 3 Gbit/s:n siirtonopeuksia. [8.]

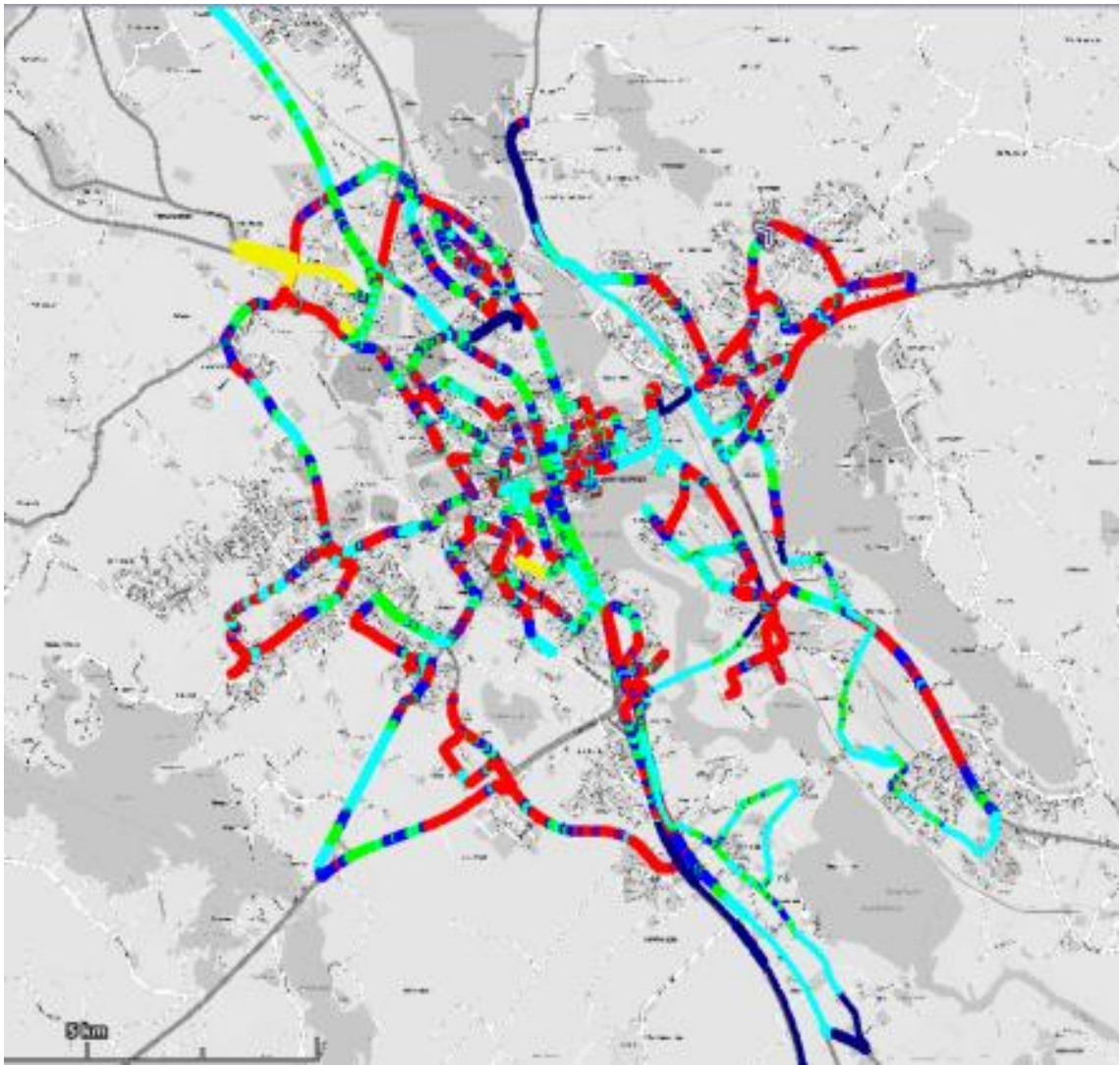
LTE-Advancen tavoitteena on pienentää latenssia, nopeuttaa handover aikaa ja kasvattaa kapasiteettiä. Tarkoituksena on pystyä käyttämään LTE-verkon antenneja myös LTE-Advance verkossa, jolloin verkon käyttöönotto olisi nopeaa. Tekniikka on vielä kehitysvaiheessa ja kuluttaverkkoja saamme odottaa. [8.]

Teknisenä testinä 2006 NTT DoCoMo onnistui siirtämään 100 MHz:n taajuuskaistalla 5 Gbps matkaviestimeen, joka liikkui nopeudella 10 km/h. Tiedotteen mukaan käytössä oli 12 lähettävää ja 12 vastaanottavaa antennia ja modulointina 64QAM. [9.]

5 DNA:n suorittama 3G- ja LTE-verkkojen siirtonopeuden mittaus.

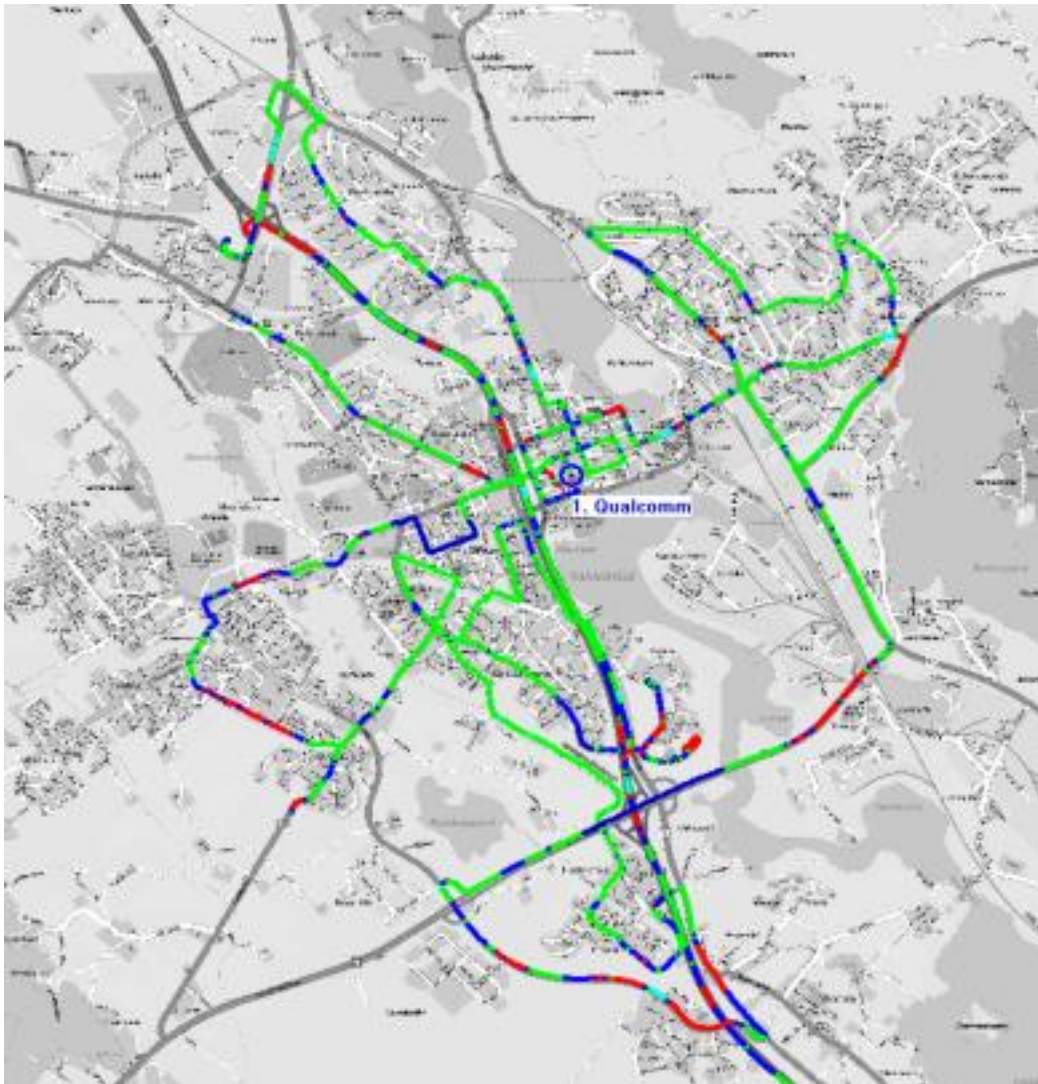
DNA teki verkkojen nopeusmittauksen eräässä suomalaisessa kaupungissa, jossa sillä on kaupungin kattava 3G- ja LTE-verkko. Mittaus tehtiin autolla, eli mittalaitteisto liikkui lähestulkoon jatkuvasti. Mittareitit erosivat vähän toisistaan, mutta pääalueet kuitenkin kummassakin mittauksessa oli autot ajaneet. Mittauksessa mitattiin puhelimella verkon antamaa datanopeutta. [7.]

3G-verkkoa mitattiin vähän laajemmin, ja siinä saatu keskimääräinen siirtonopeus oli 12,32 Mbps. Huippusiirtonopeudeksi oli mitattu 32,9 Mbps. DNA ei ottanut kantaa siihen, mitä nopeusluokkia sen tukiasemat tukivat kyseisenä ajankohtana. Saatujen tulosten perusteella kuitenkin voi olettaa kahden kanta-aallon olleen tuettuna. Kuvassa 11 turkoosilla on merkitty 0–5 Mbps, vihreällä 5–10 Mbps, sinisellä 10–15 Mbps ja punaisella 15–40 Mbps. [7.]



Kuva 11. DNA:n suorittama 3G-verkon mittaus [7.].

Kuvista 10 ja 11 voi hyvin huomata, että LTE-verkkoa ei mitattu yhtä laajasti. Kuitenkin kaupungin keskusta ja sen ympäristö oli mitattu. LTE-verkossa keskimääräinen siirtonopeus oli 35,7 Mbps ja huippusiirtonopeus 95,7 Mbps. Saavutettu huippunopeus on selkeä merkki kehityksestä, kun sitä verrataan Soneran vuonna 2010 tekemään testiin, jossa nopeudeksi oli saatu 47 Mbit/s. Kuvassa 12 turkoosilla on 0–20 Mbps, vihreällä 20–40 Mbps, sinisellä 40–60 Mbps ja punaisella 60–100 Mbps. [7.]



Kuva 12. DNA:n suorittama LTE-verkon mittaus [7.].

Kummastakin mittauksesta voimme kuitenkin todeta, että siirtonopeudet jäävät selvästi teoreettisista nopeuksista. Tukiasemien sijainteja ja määriä ei ole saatavilla, eikä tarkkaa mittadataa, joten tarkempaa arviota on mahdotonta tehdä. DNA kuitenkin ilmoitti, että alueella on toiminnassa oleva 3G- ja LTE-verkko, joten tulos näyttää realistisia arvoja.

6 Yhteenveto

Vaikka verkkojen rakenne on muuttunut, verkon eri komponenteilla päättehtävä ovat pysyneet suhteellisen samana. Kun verrataan GSM- ja LTE-verkon rakennetta voidaan huomata, että GSM-verkko on monimutkainen ja monet toiminnot voidaan yhdistää yhden verkkokomponentin alle.

Kapasiteetti on kasvanut jatkuvasti. Eri tekniikoissa on kehitetty uusia tapoja kasvattamaan kapasiteettiä ja lopulta uuden tekniikan tullessa on kapasiteetti kasvanut selvästi. Taulukossa 8 on kerätty yhteen eri tekniikoiden kapasiteetit. Tässä ei oteta huomioon sitä, että verkossa on sekä puheen että datankäyttäjää. Tulokset ovat myös teoreettisia, datanopeuksissa loppukäyttäjän saama nopeus on selvästi alhaisempi. Taulukossa on datanopeuksissa näytetty kyseiseen tekniikkaan tulleen laajennuksen nopeudet. Taulukossa 8 puhe kohdat on 2G- ja 3G-tekniikoilla näytetty kanavien määrä puolitettuna. Riippuen halutun eston määrästä, voi siis käyttäjiä olla enemmän. 4G:ssä on koetettu ottaa huomioon jo muuttuvia tekijöitä ja tulos on lähempänä totuutta. Taulukossa on kerätty yhteen eri tekniikoiden puhe- ja datamääriä. Pääsääntöisesti voidaan ajatella, että yksi kanava tarkoittaa yhtä käyttäjää, mutta kanava voidaan jakaa useammalle käyttäjälle, jolloin laatu huononee. Tämän takia taulukkoon on jätetty kanavien määrät näkyviin.

Taulukko 8. Kapasiteetin vertailu.

2G – GSM		3G – UMTS		4G - LTE	
Puhe (kanavaa)	Data (kbps)	Puhe (kanavaa)	Data (Mbps)	Puhe (käyttäjää)	Data (Mbps)
14	236,8	196	42,2	333	325

Lähteet

- 1 Jörg Eberspächer, Hans-Joerg Vögel, Christian Bettstetter, Christian Hartmann. 2009. GSM Architecture, Protocols and Services 3rd Edition. Wiley.
- 2 3GPP TS 45.001 v9.1.0. 2009. Verkkodokumentti. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/45_series/45.001/>. Päivitetty 11.2009. Luettu 13.3.2011
- 3 Timo Halonen, Javier Romero, Juan Melero. 2003. GSM, GPRS and Edge Performance : evolution towards 3G/UMTS 2nd Edition. Wiley.
- 4 Harri Holma, Antti Toskala. 2007. WCDMA for UMTS – HSPA evolution and LTE 4th Edition. Wiley
- 5 Harri Holma, Antti Toskala. 2009. LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access. Wiley
- 6 Elisan historia. 2012. Verkkodokumentti. <http://www.elisa.fi/elisa-oyj/tietoa_elisasta/historia/>. Luettu 28.4.2012.
- 7 Laari Jarkko. 2012. Verkkojohtaja, DNA Oy, Helsinki. Haastattelu 1.6.2012.
- 8 3GPP tekninen raportti 36.912
- 9 NTT docomo tiedote. 2007. Verkkodokumentti <<http://www.nttdocomo.com/pr/2007/001319.html>>. Päivitetty 2007. Luettu 24.2.2013.